

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES



DOI: 10.15507/2311-2468.013.202501.071-080

eISSN 2311-2468

EDN: <https://elibrary.ru/krawta><https://ogarev-online.ru>

УДК / UDC 619.327:624.046.5

Оригинальная статья / Original article

АНАЛИЗ МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ

Д. Р. БабушкинаНациональный исследовательский Мордовский государственный университет,
Саранск, Россия✉ delmira2009@yandex.ru**Аннотация**

Введение. Актуальность исследования обусловлена необходимостью прогнозирования долговечности бетонных конструкций с учетом их сложного многоступенчатого характера разрушения. Цель исследования – получение критериев разрушения, позволяющих проанализировать процесс трещинообразования на различных масштабных уровнях.

Материалы и методы. Для изучения данной проблемы использовались бетонные призмы и установка WilleGeotechnik (модель 13-PD/401). Полученные данные проанализированы с учетом методов фрактального анализа.

Результаты исследования. В ходе исследования проведен анализ моделей разрушения сжатых бетонных элементов. Доказано, что разрушение бетона – сложный многоступенчатый процесс, имеющий иерархию структур и включающий несколько механизмов разрушения. Выявлены закономерности накопления и расхода энергии, затрачиваемой на разрушение структурных элементов в процессе образования магистральной трещины.

Обсуждение и заключение. Предложенные критерии разрушения позволят определить, как протекает механизм разрушения на различных масштабных уровнях и каким образом происходит смена накопления и расхода энергии. Данные результаты будут полезны для исследователей механики разрушения бетона, так как позволят более точно определять процесс микротрещинообразования, что позволит повысить надежность конструкций из бетона.

Ключевые слова: разрушение при сжатии, бетон, модель, фрактал, магистральная трещина

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Бабушкина Д. Р. Анализ модели разрушения бетона при сжатии // Огарёв-online. 2025. Т. 13, № 1. С. 71–80. <https://doi.org/10.155072311-2468.013.202501.071-080>

© Бабушкина Д. Р., 2025

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

ANALYSIS OF THE CONCRETE FRACTURE MODEL DURING COMPRESSION

D. R. Babushkina

National Research Mordovia State University,
Saransk, Russia
✉ delmira2009@yandex.ru

Abstract

Introduction. The relevance of the study is due to the need to predict the durability of concrete structures, taking into account their complex multi-stage nature of destruction. The purpose of the study is to obtain fracture criteria that allow analyzing the process of cracking at various scale levels.

Materials and Methods. Concrete prisms and a WilleGeotechnik installation (model 13-PD/401) were used to study this problem. The data obtained has been analyzed using fractal analysis methods.

Results. In the course of the study, the models of destruction of compressed concrete elements were analyzed. It is proved that the destruction of concrete is a complex multi-stage process with a hierarchy of structures and several mechanisms of destruction. The patterns of accumulation and consumption of energy spent on the destruction of structural elements during the formation of the main crack are revealed.

Discussion and Conclusion. The proposed destruction criteria will allow us to determine how the destruction mechanism proceeds at various scale levels and how the energy accumulation and consumption change. These results will be useful for researchers of the mechanics of concrete fracture as they will allow to more accurately determine the process of microcracking. As a result, the reliability of concrete structures will be improved.

Keywords: compression fracture, concrete, model, fractal, main crack

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

For citation: Babushkina D.R. Analysis of the Concrete Fracture Model During Compression. *Ogarev-online*. 2025;13(1):71–80. <https://doi.org/10.155072311-2468.013.202501.071-080>

ВВЕДЕНИЕ

В практике строительства элементы, работающие на сжатие, предпочтительнее проектировать из бетона или железобетона. Однако до сих пор механизм разрушения сжатых элементов вызывает споры: является ли он отрывным или сдвиговым.

Современная теория разрушения бетона основана на гипотезах классической механики деформируемого твердого тела: структура бетона является статистически устойчивой и относительно однородной, а его разрушение воспринимается как мгновенный акт при достижении предельного состояния¹. Данные утверждения не могут быть корректными, так как очевидно, что бетон имеет неоднородную структуру с множеством различных включений.

Процесс разрушения можно описать как многоступенчатую иерархическую систему переходов, в которой каждый уровень характеризуется сменой доминирующего механизма поглощения энергии. Микроуровень связан с существованием внутренней структуры

¹ Селяев В. П., Селяев П. В., Бабушкина Д. Р. Механика разрушения бетона // Механика разрушения строительных материалов, изделий и конструкций : сб. науч. ст. по материалам заседания Научного совета Российской академии архитектуры и строительных наук. Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, 2024. С. 95–106.

деформируемого материала. Мезоуровень описывает изменение поврежденности, рост микротрещин. Макроуровень – дальнейший переход в магистральную трещину [1]. Такая иерархия структур потребует детального описания на каждом уровне для полноценного понимания системы.

Цель исследования – получить критерии разрушения бетона, которые позволят проанализировать процесс трещинообразования на различных масштабных уровнях и установить, по какому из вариантов механизмов будет происходить разрушение, что обеспечит наиболее точное определение допустимых напряжений и образовавшихся дефектов и позволит предотвратить возникновение магистральной трещины, а также подтвердит представления о бетоне как о фрактальной структуре.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Существует множество исследований, посвященных моделям разрушения бетона. Однако, к сожалению, до сих пор не создано единой разработанной теории, которая бы полностью описывала процесс разрушения этого материала². Поэтому вопрос ее создания остается актуальным.

Согласно мнению А. А. Гвоздева, прочность бетона при сжатии во многом определяется вторичным полем напряжений³. Не менее важным считается способность бетона противостоять отрыву по площадкам, которые параллельны направлению сжимающих сил.

О. Я. Берг последовательным микрофотографированием подтвердил гипотезу об отрывном механизме разрушения бетона при сжатии. По его мнению, «микроразрушение структуры бетона под нагрузкой представляет собой процесс раскрытия микротрещин, первоначально образовавшихся в структуре бетона во время твердения бетонной смеси»⁴.

Предложены методы определения предельной несущей способности элементов с помощью аппарата математической теории пластичности идеально пластичной среды⁵. Н. Т. Ву и Н. В. Федорова, применяя данные методы, предлагают методику определения момента трещинообразования в железобетонных элементах на основе нелинейной диаграммы деформирования бетона, что позволило бы более точно оценивать трещиностойкость элементов конструкций [2].

По результатам исследований, проведенных В. М. Бондаренко, выделена первостепенная роль вторичного поля напряжений в процессе разрушения бетона при осевом сжатии⁶. Дополнительно он отмечает, что для построения расчетных моделей отсутствуют необходимые обобщения, которые позволили бы учесть меняющуюся структуру бетона под воздействием множества факторов (нагрузка, температурные воздействия, воздействия окружающей среды и т. д.) [3].

² Броек Д. Основы механики разрушения. М. : Высшая школа, 1980. 368 с.; Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 416 с.; Чернышов Е. М., Дьяченко Е. И., Макеев А. И. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов: вопросы материаловедческого обобщения и развития теории : моногр. Воронеж, 2012. 98 с.

³ Новое о прочности железобетона / А. А. Гвоздев [и др.]. М. : Стройиздат, 1977. 272 с.

⁴ Берг О. Я., Щербаков Е. Н., Писанко Е. Н. Высокопрочный бетон. М. : Стройиздат, 1971. 208 с.

⁵ Гениев Г. А., Киссюк В. Н., Тюпин Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона. М. : Стройиздат, 1974. 316 с.

⁶ Бондаренко В. М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. М. : Стройиздат, 1982. 287 с.

Таким образом, проблематика создания единой теории разрушения бетона продолжает оставаться актуальной, что связано с отсутствием единого подхода к описанию этого процесса. Его разработка позволит устранить существующие недостатки и значительно повысить точность определения процесса трещинообразования. В работе [4] предлагается один из путей устранения данной проблематики, что в совокупности с развитием новых методов исследований позволит более точно описывать процессы, происходящие в бетоне при сжатии, и разработать единую теорию разрушения бетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Представление процесса разрушения как иерархического перехода позволяет выявить признаки самоподобия структуры материала на всех уровнях [5]. Для экспериментального подтверждения фрактальной природы и инвариантности структуры бетона необходимо определить фрактальные размерности, характеризующие каждый из этих уровней [6]. Такой подход обеспечивает более глубокое понимание механизма разрушения бетона и создает предпосылки для разработки методов прогноза и управления долговечностью материалов.

Экспериментально установлено, что разрушение бетона – сложный многоступенчатый процесс, который развивается во времени. В ходе этого процесса на разных масштабных уровнях структуры могут действовать одновременно несколько механизмов разрушения: хрупкий, пластический, отрывной, сдвиговой. Поэтому при теоретическом обосновании механики разрушения сжатого бетона следует учитывать:

- 1) особенности строения структуры бетона;
- 2) разрушение как процесс образования новых поверхностей;
- 3) дискретный характер разрушения бетона.

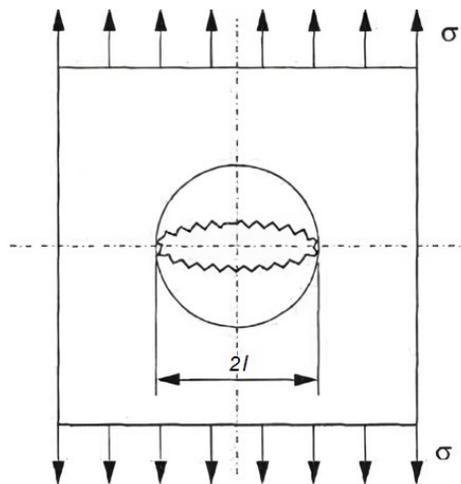
Необходимо разработать аналитический метод определения начала процесса микротрещинообразования под нагрузкой, чтобы повысить надежность железобетонных конструкций. В рамках механики разрушения деформируемого твердого тела, разрушение предлагается трактовать как процесс развития трещины, используя при этом различные геометрические модели (рис. 1).



Р и с. 1. Геометрические модели трещины:
 1 – разрез; 2 – эллипс; 3 – лунка; 4 – прямоугольник
 Fig. 1. Geometric crack models:
 1 – incision; 2 – ellipse; 3 – hole; 4 – rectangle

Источник: рисунок взят из источника [5].
 Source: the drawing is taken from the source [5].

В качестве решения задачи о прочности твердого тела с трещиной наиболее часто используется модель, предложенная А. Гриффитсом (рис. 2), который связал причины развития трещины в теле и процессы накопления и высвобождения энергии деформаций. В его модели принят узкий эллиптический вырез, характеризующий трещину, в которой предполагается переход энергии релаксации упругих связей (u) в энергию вскрывающихся поверхностей (A) в процессе ее роста.



Р и с. 2. Модель Гриффитса SOS (solid on solid)
F i g. 2. Griffiths SOS Model (solid on solid)

Источник: здесь и далее рисунки составлены автором.

Source: here and further, the drawings are compiled by the author.

Для изучения реального процесса разрушения бетона недостаточно исследования поведения макроскопических дефектов, таких как магистральные трещины. Необходимо также учесть процессы, происходящие на микроуровне материала. В. П. Селяевым и др. рассматриваются несколько фрактальных моделей структуры бетона, в которых подразумевается наличие трещин l , ориентация которых является произвольной [7]. Данные фрактальные модели предлагается принять за основу для дальнейших исследований.

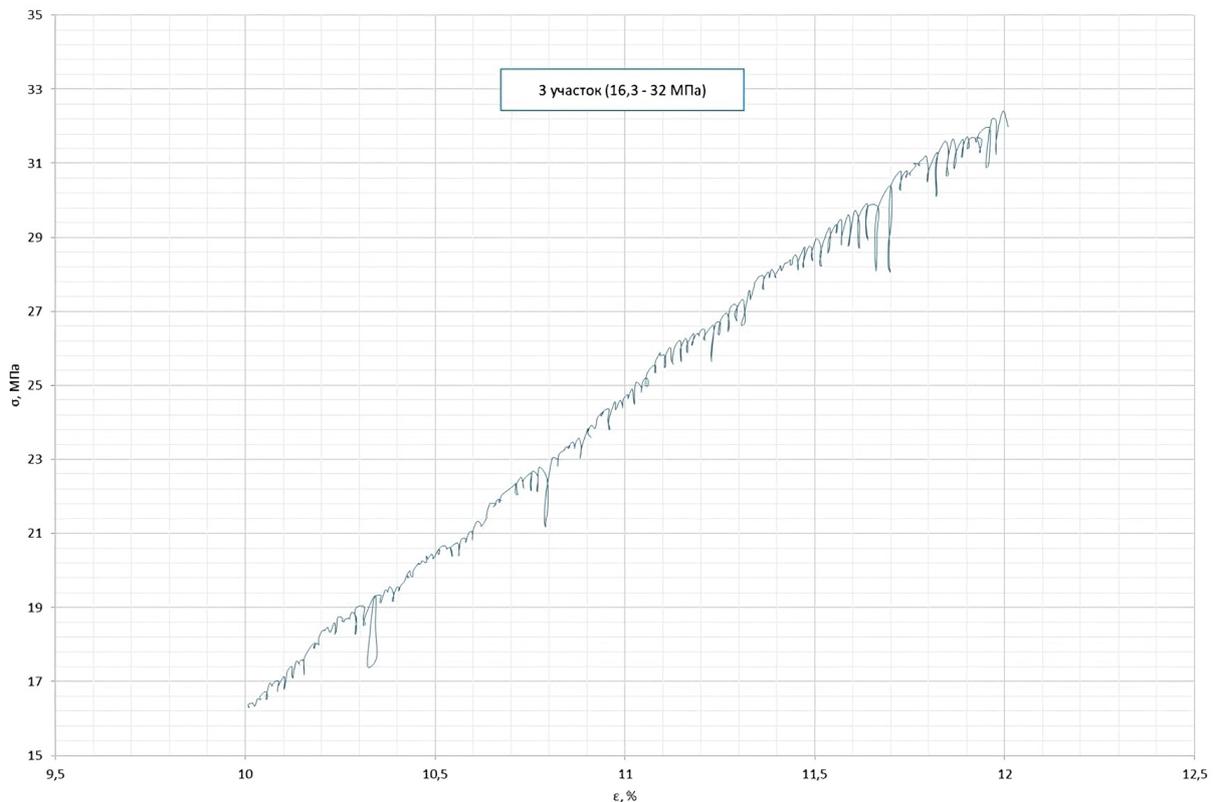
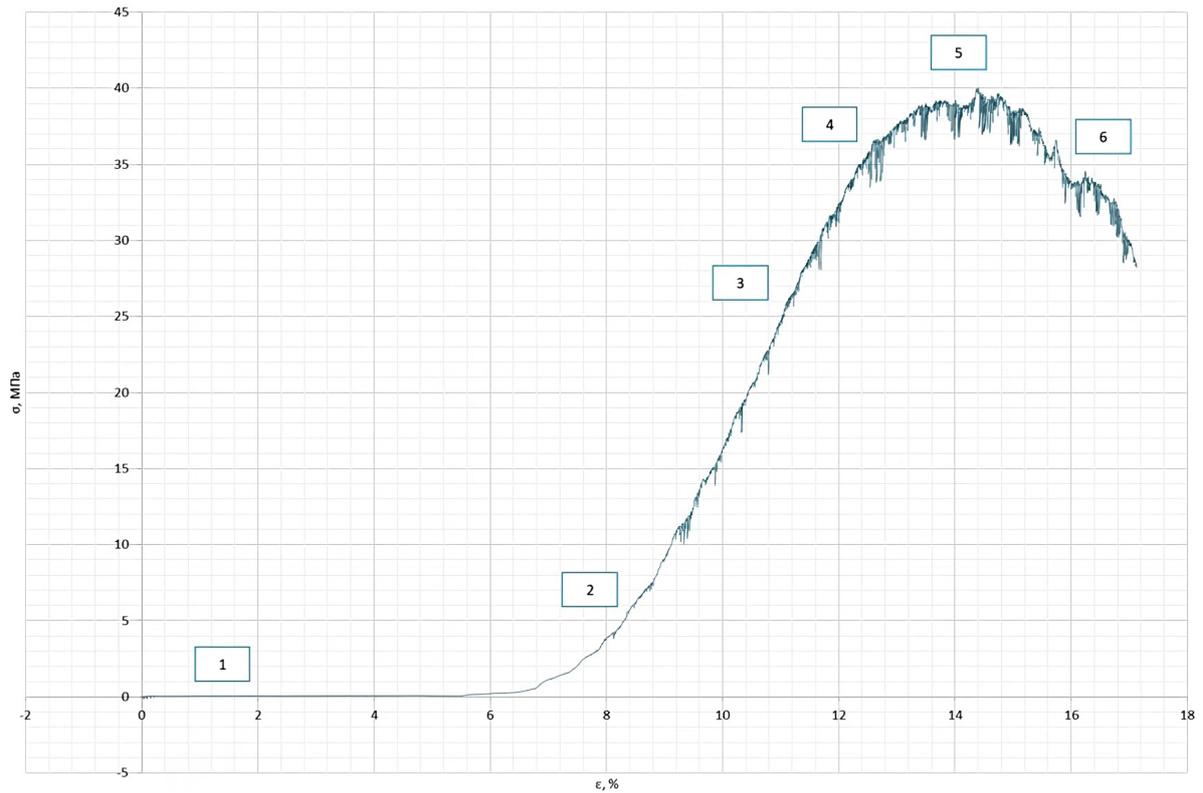
В ходе испытаний также применялась установка WilleGeotechnik (модель 13-PD/401), в качестве образцов использовались призмы, изготовленные из тяжелого бетона В30.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим диаграмму деформирования, полученную в ходе испытаний (рис. 3). Можно заметить, что она имеет не гладкую структуру. При увеличении масштаба линия приобретает форму петли, что может указывать на дискретный характер разрушения бетона при сжатии.

Накопление энергии происходит поступательно, благодаря тому, что микротрещины чередуются с заполнителем-демпфером. Это отражено на диаграмме в виде петель, каждая из которых характеризует разрушение отдельного структурного элемента. Процесс повторяется многократно, пока не будет достигнуто полное разрушение на пике напряжений.

На уровне макроструктуры рост трещины сопровождается разрушением фрактальных структур, характерных для мезо- и микроструктурных масштабов. Каждое снижение нагрузки и образование петель на диаграмме деформирования можно интерпретировать как разрушение фракталов на соответствующем масштабном уровне [8]. При этом процесс разрушения можно разделить на несколько этапов, каждый из которых характеризуется определенными значениями энергии разрушения и фрактальной размерности, отражающими особенности развития магистральной трещины в структуре бетона (рис. 3).



Р и с. 3. Диаграмма деформирования, полученная в ходе испытаний на сжатие образца 4×4×16 из тяжелого бетона В30 разрушающим методом на установке WilleGeotechnik (модель 13-PD/401)
 F i g. 3. The deformation diagram obtained during compression tests of a 4×4×16 specimen of heavy concrete B30 using the destructive method at the facility WilleGeotechnik (model 13-PD/401)

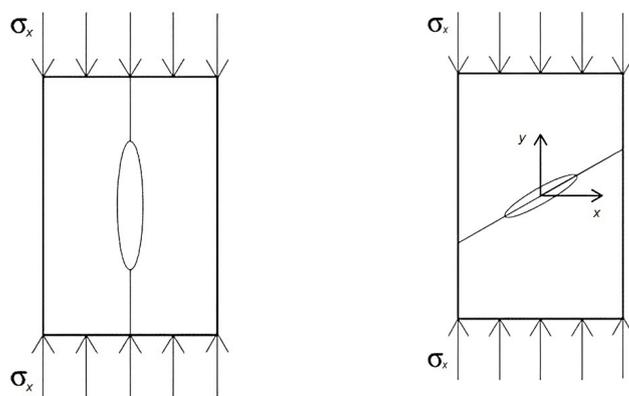


Следует отметить, что идеальным самоподобием обладают лишь математические фракталы. Поэтому фрактал, описывающий формирующуюся трещину, можно рассматривать лишь как аппроксимацию реального процесса разрушения.

Далее рассмотрим варианты механизма разрушения бетона под действием сжимающих нагрузок – отрывной и сдвиговой (рис. 4).

В структурном элементе реального твердого тела под действием сжимающих нагрузок формируется магистральная трещина l_i , которая может иметь произвольную ориентацию. Предположим, что ось трещины находится в плоскости разрушения, которая образует угол α с горизонтальной плоскостью (рис. 5). На структурный элемент в виде призмы действуют сжимающие нагрузки N_x , под действием которых образуется вторичное поле напряжений. Действие вторичных напряжений можно представить в виде фиктивных нагрузок N_y .

Под действием сил N_x возможна реализация сдвигового механизма разрушения. Силы N_y могут явиться инициаторами отрывного механизма разрушения.



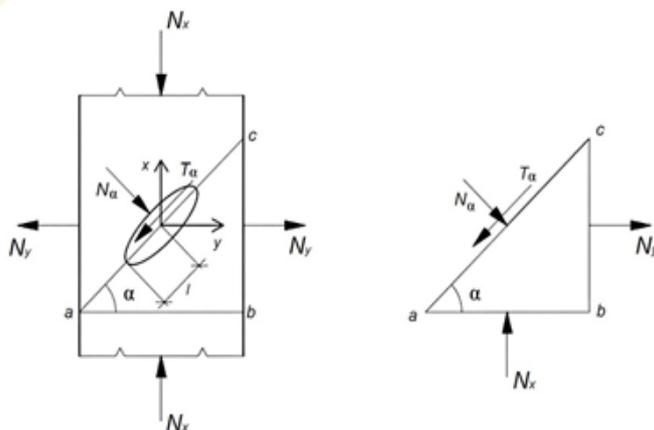
а) б)

Р и с. 4. Разрушение бетона по механизму:

а) отрывному; б) сдвиговому

F i g. 4. Destruction of concrete by the mechanism of:

a) tear-off; b) shear



Р и с. 5. Напряжения, действующие на фрактальный элемент в структуре бетона

F i g. 5. Stresses acting on the fractal element of the concrete structure

Отрывной механизм разрушения при сжатии характерен для материалов с высокими значениями коэффициентов Пуассона (μ) и внутреннего трения (ν)⁷.

При предельном случае, когда плоскость разрушения бетона ориентирована вдоль силовых сжимающих сил ($\alpha = 90^\circ$), получим условие реализации отрывного механизма разрушения под действием сжимающих нагрузок:

$$\sigma_{x1} = \frac{K_1}{\sqrt{\pi l_i}} \frac{1}{\mu},$$

где K_1 – коэффициент интенсивности напряжений при отрывном механизме; l_i – длина трещины на i -ом масштабном уровне; μ – коэффициент Пуассона.

Для определения условия реализации разрушения по сдвиговому механизму потребуется применить условие прочности Кулона-Навье:

$$\tau_\alpha \leq R_{bt} + \nu \sigma_\alpha.$$

После чего получим условие для определения величины сжимающих напряжений σ_{x2} , при достижении которых будет возможен сдвиговой механизм разрушения:

$$\sigma_{x2} \leq \frac{2K_2}{\sqrt{\pi l_i} (1+\mu) \sin 2\alpha - \nu(1-\mu) - \nu(1+\mu) \cos 2\alpha},$$

где K_2 – коэффициент интенсивности напряжений при сдвиговом механизме разрушения; l_i – длина трещины на i -ом масштабном уровне; μ – коэффициент Пуассона; ν – коэффициент внутреннего трения.

Для того чтобы получить условия, определяющие механизм разрушения бетона под действием сжимающих нагрузок на различных масштабных уровнях, необходимо применить методы фрактальной геометрии, согласно которым все структурные элементы, входящие в систему, подчиняются закону Мандельброта-Ричардсона, который описывает степенной функцией зависимость между геометрической характеристикой и масштабом измерения:

$$L = L_0 (\alpha)^{d_e - d_m},$$

где L_0 – константа; α – масштаб измерений; d_e и d_m – размерность объекта в Евклидовом d_e и фрактальном d_m пространстве.

Учтем в ранее полученных условиях принципы многомасштабности и самоподобия структурных элементов и получим формулы для определения предельных значений напряжений для каждого из масштабных уровней:

$$\sigma_{x1} = \frac{K_1}{\mu} \left[\pi l_0 (\alpha)^{d_e - d_m} \right]^{-0.5},$$

$$\sigma_{x2} = \frac{2K_2}{(1-\nu) + \mu(1+\nu)} \left[\pi l_0 (\alpha)^{d_e - d_m} \right]^{-0.5}.$$

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ существующих подходов к моделированию процесса разрушения сжатых бетонных элементов, проведение эксперимента позволили сделать вывод, что разрушение бетона представляет собой сложный процесс, включающий несколько масштабных уровней, схожих по структуре материала на каждом из них.

Полученные критерии разрушения могут быть применимы для определения допустимых геометрических характеристик трещины или дефекта, которые могут формироваться как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации конструкции. Превышение данных критериев приведет к росту трещины при заданном расчетном напряжении. Данные критерии также позволят определить механизм разрушения бетона на различных масштабных уровнях, что позволит подтвердить представление о структуре бетона как неоднородной, имеющей множество трещин и дефектов, из которых в последствии, с приложением нагрузки, формируется магистральная трещина. Возможность применения предложенных критериев для определения надежности бетонных конструкций обоснована за счет более точного описания процесса трещинообразования под воздействием сжимающей нагрузки.

Полученные результаты способствуют переходу от эмпирических подходов к системному анализу механики разрушения, что является критически важным для повышения долговечности и безопасности конструкций и сооружений из бетона.

Основное направление для дальнейших исследований – разработка единой теории разрушения бетона, в которой будет учтена неоднородная, многоуровневая, фрактальная структура бетона.

Материалы статьи могут быть полезны как исследователям в области механики разрушения, так и материаловедам, а также проектировщикам и инженерам-строителям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селяев В. П., Селяев П. В., Кечуткина Е. Л. Эволюция теории прочности бетонов. От простого к сложному // Строительные материалы. 2016. № 12. С. 70–79. EDN: XHFQGH
2. Vu N. T., Fedorova N. V. Calculation of the Formation of Normal Cracks in a Reinforced Concrete Element Based on the Deformation Theory of Plasticity of Concrete by G.A. Geniev // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2023. Vol. 19, No. 1. Pp. 3–16. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-1-3-16>
3. Бондаренко В. М. Феноменология кинетики повреждений бетона железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде // Бетон и железобетон. 2008. № 2. С. 25–27. EDN: ISDKDR
4. Некоторые аспекты математических моделей трещиностойкости стержневых железобетонных элементов / О. В. Радайкин [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2023. № 8. С. 425–439. EDN: OOHLLT
5. Щелкова М. А., Слободян С. Б., Дырда В. И. Фрактальный подход к механике разрушения твердых тел // Геотехническая механика. 2018. № 138. С. 227–259. URL: <https://clck.ru/3GfEz6> (дата обращения: 02.02.2025).
6. Механика разрушения бетона с учетом фрактальных свойств структуры / В. П. Селяев [и др.] // Региональная архитектура и строительство. 2024. № 2. С. 117–125. https://doi.org/10.54734/20722958_2024_2_117
7. Селяев В. П., Селяев П. В., Хамза Е. Е. Основы теории деградации и прогнозирования долговечности железобетонных конструкций с учетом фрактального строения структуры материала // Эксперт: теория и практика. 2022. № 1. С. 23–36. https://doi.org/10.51608/26867818_2022_1_23
8. Фрактальная квантово-механическая модель деформирования и разрушения бетона / В. П. Селяев [и др.] // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 4. С. 31–40. EDN: VCQSCI

REFERENCES

1. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Kechutkina E.L. Evolution of the Theory of Concrete Strength. From Simple to Complex. *Stroitelnye Materialy*. 2016;(12):70–79. (In Russ. abstract in Eng.) EDN [XHFQGH](#)
2. Vu N.T., Fedorova N.V. Calculation of the Formation of Normal Cracks in a Reinforced Concrete Element Based on the Deformation Theory of Plasticity of Concrete by G.A. Geniev. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023;19(1):3–16. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-1-3-16>
3. Bondarenko V.M. [Phenomenology of Kinetics of Damaged Concrete in Reinforced Concrete Constructions Exposed to Aggressive Environment]. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2008;(2):25–27. (In Russ.) EDN: [ISDKDR](#)
4. Radaykin O.V., Sabitov L.S., Korol O.A., Darvish A., Arakcheev T.P., Garkin I.N. Some Aspects of Mathematical Models of Crack Resistance of Core Reinforced Concrete. *Engineering Journal of Don*. 2023;(8):425–439. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [OOHLLT](#)
5. Schelokova M.A., Slobodian S.B., Dyrda V.I. Fractal Approach to Solid Fracture Mechanics. *Geotechnical Mechanics*. 2018;(138):227–259. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3GfEz6> (accessed 02.02.2025).
6. Selyaev V.P., Kupriyashkina L.I., Babushkina D.R., Busargin D.A. The Mechanics of Concrete Destruction, Taking into Account the Fractal Properties of the Structure. *Regional Architecture and Engineering*. 2024;(2):117–125. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.54734/20722958_2024_2_117
7. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Hamza Ye.E. Foundations of the Theory of Degradation and Prediction of the Durability of Reinforced Concrete Structures, Taking into Account the Fractal Structure of the Structure. *Expert: Theory and Practice*. 2022;(1):23–36. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.51608/26867818_2022_1_23
8. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Lazarev A.L., Gryaznov S.Yu., Averkina M.Yu. Fractal Quantum-Mechanical Model of Concrete Deformation and Destruction. *Regional Architecture and Engineering*. 2022;(4):31–40. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [VCQSCI](#)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бабушкина Дельмира Рафиковна, аспирант кафедры строительных конструкций Института архитектуры и строительства Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), SPIN-код: [5073-7377](#), delmira2009@yandex.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Поступила 10.01.2025; одобрена после рецензирования 28.02.2025; принята к публикации 06.03.2025.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Delmira R. Babushkina, Postgraduate Student of the Department of Building Structures Institute of Architecture and Construction, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), SPIN-code: [5073-7377](#), delmira2009@yandex.ru

The author has read and approved the final manuscript.

Submitted 10.01.2025; revised 28.02.2025; accepted 06.03.2025.